

0716670-1

Министерство образования Российской Федерации  
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

НАСЫРОВ Игорь Альбертович

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН  
ЧЕРЕЗ ВЕРХНЮЮ ИОНОСФЕРУ, ВОЗМУЩЕННУЮ  
НАКЛОННЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ**

*Специальность 05.12.01 – «Теоретические основы радиотехники»*



АВТОРЕФЕРАТ

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

КАЗАНЬ - 2000

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



0000947822

Работа выполнена в Казанском государственном университете

Научное руководство:

доктор физико-математических наук

Бочкарев Г. С.

(г. Москва, ИЗМИРАН)

доктор физико-математических наук,

профессор Черкашин Ю. Н. (г. Москва, ИЗМИРАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

профессор Иванов В. А. (г. Йошкар-Ола, МарГТУ)

доктор физико-математических наук

Фахрутдинова А. Н. (г. Казань, КГУ)

Ведущая организация:

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

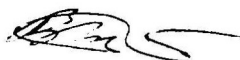
Защита диссертации состоится «5» июля 2000 г. в 210 аудитории физического факультета Казанского государственного университета на заседании Диссертационного Совета Д 053.29.05 по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, КГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н. И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан

«\_\_» июня 2000 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 053.29.05  
кандидат технических наук



В. С. Бухмин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Ионосфера – часть верхней атмосферы Земли, простирающаяся от высоты 60 километров до примерно одного радиуса Земли. В этой области атмосфера представляет собой частично ионизированный газ – плазму. Структура и свойства ионосферы сильно изменяются с высотой. Процессы, протекающие в ионосфере, тесно связаны с волновым и корпускулярным излучением Солнца, с процессами в магнитосфере и вариациями магнитного поля Земли, с движениями верхней атмосферы и т. д. Этим обусловлена сильная изменчивость свойств ионосферы во времени (в зависимости от времени суток, времени года, циклами Солнечной активности), а так же в зависимости от высоты и географической широты.

Впервые идея искусственного изменения параметров верхних ионизированных атмосферных слоев была высказана в 20-х годах нашего столетия. Так, Бейли в своей работе [4] указал на возможность нагрева *E*-области ионосферы мощным электромагнитным радиоизлучением передатчика, располагающегося на поверхности Земли и работающего на частоте близкой к gyro-частоте электронов.

Теоретически возможность омического нагрева *F*-области ионосферной плазмы мощным коротковолновым радиоизлучением была разработана Гинзбургом и Гуревичем в 60-х годах [5], а также в работах Фарлея [6] и Мельтца и Ле Левьера [7]. В начале 70-х годов учеными ИЗМИРАН (Ю. Н. Черкашин, В. А. Баранов) было обращено внимание на возможность учета эффектов дифракции усиливающихся за счет омического разогрева ионосферы при наклонном распространении КВ радиоволн. В [10] была высказана идея возможности захвата радиоволн путем модификации *F*-области ионосферы в приподнятый ионосферный канал за счет такого механизма.

К настоящему времени экспериментально [1, 2] и теоретически [8] доказано, что при нормальном падении мощного декаметрового радиоизлучения на ионосферу в ней происходят процессы, приводящие к нарушению ионизационно - рекомбиционного баланса и возбуждению искусственной ионосферной турбулентности. При этом существенно изменяются условия распространения радиоволн в ионосфере. При воздействии на ионосферу вертикальным радиоизлучением *O*-поляризации реализуется резонансный характер взаимодействия мощной волны накачки с плазмой на частотах, близких к локальной плазменной частоте в ионосфере.

Явления, развивающиеся в ионосфере при наклонном распространении мощных радиоволн, изучены менее, чем в случае вертикального облучения ионосферы. Принципиально важным является то, что в этом случае волна накачки не достигает уровня плазменных резонансов. В этом случае могут оказаться важными другие физические причины, приводящие к модификации ионосферы [3].

Известно, что суммарная мощность излучения радиосредств КВ диапазона, расположенных в Европейских и Азиатских регионах, сравнима с мощностью специально разработанных радиосредств [9], используемых в экспе-

риментах по модификации ионосферы. Эффективность воздействия на ионосферу радиоизлучением в существенной степени зависит от ее состояния в естественных (т.е. невозмущенных радиоизлучением) условиях. Наиболее ярко это проявляется в условиях субавроральной и авроральной ионосферы. Учет геофизических условий проведения экспериментов по нагреву ионосферы наклонным радиоизлучением необходим при постановке экспериментов и анализе получаемых данных.

Изучение совокупности явлений, возникающих в поле мощных радиоволн, наклонно падающих на ионосферу, а также влияние модифицированной ионосферы на характеристики радиоволн в канале распространения сохраняют свою актуальность. Это связано как с недостаточной изученностью физических процессов в модифицированной ионосфере, так и с широким распространением радиосредств, мощности которых достаточно для изменения свойств ионосферы в условиях штатного их использования для целей вещания, связи, радионавигации и т.п. Увеличивается уровень взаимных помех в радиоканалах из-за возникновения искусственных каналов распространения радиоволн.

Нелинейные эффекты в ионосфере, возникающие при распространении мощных КВ радиосигналов могут привести к ограничению роста уровня поля в точке приема из-за изменения параметров ионосферы, а также породить дополнительные возмущения в среде распространения радиоволн. В промышленно развитых регионах количество радиосредств, излучение которых преднамеренно «засвечивает» какой-либо регион, может на порядок превосходить количество радиостанций, целенаправленно работающих в данном направлении [11]. Поэтому необходимы исследования уровня электромагнитного фона (ЭМФ) для интерпретации результатов экспериментов по активному воздействию на среду.

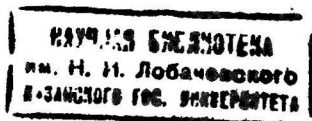
Исследования электромагнитного фона представляются важными и с точки зрения экологии среды обитания, т.к. даже слабые электромагнитные поля могут оказывать сильное воздействие на человека.

Постановка экспериментов по воздействию на ионосферу мощным наклонным радиоизлучением требует больших затрат. Не всегда удастся осуществить контроль состояния ионосферы в период проведения измерений экспериментальными методами. Поэтому становится важной для интерпретации экспериментальных данных, при расчете параметров радиоволн, в особенности на радиопереносных, проходящих в ионосфере высоких широт, опора на ионосферные модели, адекватные геофизическим условиям проведения измерений.

#### Цели и основные задачи диссертационной работы.

Целью работы является исследование эффектов, возникающих в ионосферной плазме при воздействии на нее мощным наклонным декаметровым радиоизлучением, и изменений параметров декаметровых радиоволн, распространяющихся в ионосфере в условиях естественной и искусственной возмущенности.

В соответствии с поставленной целью в настоящей работе проводились:





- разработка автоматизированного приемного комплекса (АПК) для проведения экспериментальных исследований вариаций параметров декаметровых радиоволн в естественно и искусственно возмущенной ионосфере;
- экспериментальные исследования изменений параметров декаметровых радиоволн при воздействии на ионосферу мощным наклонным радиоизлучением на среднеширотных и субавроральных радиополосах;
- экспериментальные исследования амплитудно-фазовых вариаций декаметровых радиоволн на двух пространственно разнесенных радиополосах в зависимости от времени суток и сезона;
- измерения уровня электромагнитного фона (ЭМФ) в диапазоне частот 1-32 МГц и оценки зависимости уровня ЭМФ от состояния ионосферы;
- экспериментальные исследования эффективной ширины ионосферного канала распространения декаметровых радиоволн в среднеширотной, субавроральной и высокоширотной ионосфере и ее зависимости от гелиогеофизических факторов;
- сравнительный анализ соответствия различных моделей ионосферы экспериментальным данным для условий высоких широт.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы определяется тем, что в ней впервые:

- в экспериментах по модификации ионосферы мощным наклонным декаметровым радиоизлучением в условиях субавроральной ионосферы обнаружен эффект уменьшения амплитуды сигнала в течении примерно 2-3 минут после включения волны накачки на 5-8 % относительно уровня, характерного для регулярной (невозмущенной радиоизлучением) ионосферы;
- в экспериментах по модификации ионосферы мощным наклонным декаметровым радиоизлучением в среднеширотных условиях обнаружен эффект изменения частотного спектра флуктуаций амплитуды пробных радиоволн, коррелированный с циклами изменения мощности нагрева;
- по двухлетнему циклу измерений определены сезонно-суточные изменения уровня электромагнитного фона в диапазоне частот 1-32 МГц для Московского региона и выявлена их связь с параметрами, определяемыми состоянием ионосферы;
- на основе двухлетнего цикла измерений амплитудно-фазовых вариаций радиосигналов на двух пространственно разнесенных трассах получен средний фон доплеровских смещений частоты для различного времени суток и сезона;
- выявлен эффект контроля межпланетным магнитным полем частотной ширины ионосферного канала связи в декаметровом диапазоне в субавроральной ионосфере;
- проведен анализ соответствия экспериментальным данным моделей ионосферы (СМИ-88, IRI-89, РМИ-81) показавший, что эти модели дают близкие значения высотных профилей электронной концентрации в невозмущенной ионосфере в дневные часы: в утренне-вечерние и ночные часы, а также при наличии возмущений более полное описание особенностей ионосферы высоких широт дает модель СМИ-88.

**Научная и практическая значимость.** Проведенные исследования расширяют представления о физике нелинейного взаимодействия высокочастотного радиоизлучения с ионосферной плазмой. Полученные в ходе экспериментов по воздействию на ионосферу мощным наклонным радиоизлучением результаты представляют интерес как с точки зрения фундаментальных, так и прикладных исследований.

Спектральные исследования доплеровских записей радиосигналов на двух пространственно разнесенных трассах и измерения электромагнитного фона в условиях регулярной (невозмущенной) ионосферы дают сведения о характерных периодах колебаний в ионосфере, а также позволяют изучить частотные искажения при ионосферном распространении коротких радиоволн. Изучение этой проблемы важно как для лучшего понимания физики явлений, происходящих в ионосфере, так и для более надежного выявления, анализа и интерпретации эффектов, наблюдающихся в экспериментах по искусственной модификации параметров ионосферной плазмы, а также для планирования и проведения новых экспериментов по искусственному изменению параметров ионосферной плазмы. Полученные в диссертационной работе результаты представляют интерес для специалистов, занимающихся проектированием электромагнитной совместимости радиосистем.

Совместный анализ особенностей распространения КВ в высокоширотной ионосфере и гелиогеофизических условий эксперимента позволил заключить, что вариации эффективной ширины ионосферного канала распространения радиоволн контролируются состоянием межпланетного магнитного поля. Последнее свидетельствует о необходимости учета состояния межпланетного магнитного поля в проблеме моделирования и прогнозирования ионосферных условий и характеристик распространения радиоволн.

Проведенный в диссертационной работе анализ сравнения модельных представлений ионосферных параметров с экспериментальными данными показал, что из проанализированных моделей, наиболее адекватно и полно описывающих высокоширотные особенности, является СМИ-88. Однако и эта модель требует более строгого учета положения и динамики крупномасштабных структур (овал, провал) при изменении магнитной активности и состояния межпланетного магнитного поля (особенно в южном полушарии), имеющих большое значение для распространения радиоволн.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. При распространении мощного наклонного декаметрового радиоизлучения через ионосферу происходит модификация ее параметров, которая проявляется:
  - а) в уменьшении амплитуды пробных волн на ~5-8 % относительно фонов (невозмущенного радиоизлучением) уровня через ~2-3 минуты после момента включения волны накачки;
  - б) в изменениях частотного спектра флуктуаций амплитуды пробных радиоволн, коррелированных с циклами изменения мощности нагрева.
2. Зависимость уровня электромагнитного фона в диапазоне частот 1-32 МГц от времени суток, сезона и параметров, определяющих состояние ионосферы (главным образом от критической частоты слоя F2).

3. Суточно-сезонные вариации доплеровских смещений частоты и уширения спектров радиосигналов, принимаемых на двух пространственно разнесенных трассах различной протяженности.
4. Эффект контроля межпланетным магнитным полем частотной ширины ионосферного канала связи в декаметровом диапазоне частот в субавроральной ионосфере.
5. Результаты сравнения моделей ионосферы (СМИ-88, IRI-89, РМИ-81) с экспериментальными данными, свидетельствующие о преимуществах модели СМИ-88 для условий высоких широт.

**Личный вклад.** Экспериментальные работы по воздействию на ионосферу мощным наклонным радиоизлучением, а также по исследованию частотной ширины ионосферного канала распространения выполнены в больших авторских коллективах. В диссертации подробно излагаются только те результаты, вклад автора в которые был существенным на этапах, включающих обработку, анализ и обсуждение ранее полученных данных, подготовку публикаций.

Совместно с Ю. М. Агафонниковым автором была разработана схема узкополосного фильтра общей селекции для автоматизированного приемного комплекса (АПК). Автором разработано программное обеспечение для автоматизированного приемного комплекса, включающее в себя программы управления комплексом, программы первичной обработки и программы визуализации экспериментальных данных. Причем программное обеспечение разрабатывалось для двух платформ (ЭВМ СМ4 и IBM PC).

Совместно с Ю. М. Агафонниковым проведен двухлетний цикл измерений параметров радиосигналов на двух пространственно разнесенных трассах и уровня электромагнитного фона в диапазоне частот 1÷32 МГц. Автор принимал участие в анализе полученных данных и подготовке публикаций.

При проведении сравнительного анализа модельных представлений ионосферных параметров автор принимал участие в расчетах по модели СМИ-88, в анализе и обсуждении полученных результатов, подготовке публикаций.

**Апробация результатов.** Данная диссертация выполнялась в Институте Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн и в Казанском государственном университете. Основное ее содержание опубликовано в работах [А1-А26] и докладывалось на Российских научно - технических конференциях «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов» (С.- Петербург, 4-я, ЭМС-96, 1996; 5-я, ЭМС-98, 1998), на Международном симпозиуме "Мониторинг окружающей Среды и проблемы Солнечно - Земной физики" посвященном 60-летию регулярных ионосферных исследований (Томск, 1996), на Всероссийских конференциях «Распространение радиоволн» (XVII, Ульяновск, 1993; XVIII С. Петербург, 1996; XIX, Казань, 1999), на XXVth General Assembly URSI (Lille, France, 1996), на COSPAR Scientific Assembly (30th Hamburg, Germany, 1994; 31th Birmingham, United Kingdom, 1996), на IV Международной конференции «Распространение и дифракция электромагнитных волн в неоднородных средах» (Москва, 1994), на IV Suzdal URSI Symposium on artificial Modification of the Ionosphere (Uppsala,

Sweden, 1994), на Международной конференции «100-летие начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождения радиотехники» (Москва, 1995), на Международных симпозиумах по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (С.-Петербург, 1-я, 1995; 2-я, 1997), на Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ленинские горы – 95» (Москва, МГУ, 1995), на Всероссийской научно-технической конференции «Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация» был получен диплом за лучший доклад (Воронеж, 1997), на 52-ой Научной сессии общества им. А.С. Попова (Москва, 1997), на XI Всероссийской школе-конференции по дифракции и распространению радиоволн (Москва, 1998), на II-ой Республиканской научной конференции молодых ученых и специалистов (Казань, 1996).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 26 печатных работах. Список работ приведен в автореферате. Ссылки на авторские публикации обозначены дополнительной буквой А перед порядковым номером.

**Реализация результатов.** Результаты, полученные в диссертационной работе, использовались при выполнении следующих проектов:

- программа «Университеты России»: «Распространение радиоволн в околоземном космическом пространстве», раздел 5, 1992-1995;
- грантов РФФИ: проект №17079, 1994; проект №94-05-17079а, 1995 (научный руководитель Бочкарев Г. С. ИЗМИРАН, Москва); проект № 99-02-16479, 1999 (научный руководитель Фролов А. Л., НИРФИ, Н. Новгород);
- грант Госкомвуза РФ: «Развитие мелкомасштабных неоднородностей в ионосферной плазме, возмущенной мощным наклонным радиоизлучением» (шифр №92-0-8.2-20);
- грант Конкурсного центра «Фундаментальные проблемы охраны окружающей Среды и экологии человека» (шифр №2-11);
- грант КЦ Фундаментального естествознания Минобразования РФ (проект №97-0-0.1-16);
- результаты использованы при подготовке курса лекций "Компьютерное моделирование и ЭВМ в научном эксперименте".

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из Введения, трех глав и Заключения. Работа содержит \_\_ страниц основного текста, 46 рисунков, 4 таблицы и 18 страниц цитируемой литературы (134 названия).

**Работа выполнялась при поддержке** Фонда Сороса (стипендия «Соросовские студенты и аспиранты» (грант № а1490, 1995; грант № а9625-13, 1996)) и Государственной научной стипендии для молодых ученых (постановление Президиума РАН № 66 от 15.04.97).

**Благодарности.** Автор диссертационной работы выражает искреннюю признательность Агафонникову Юрию Михайловичу, Бочкареву Геннадию Сергеевичу, Лянному Борису Евгеньевичу, Насырову Альберту Махмутовичу, Соболевой Тамаре Николаевне, Черкашину Юрию Николаевичу и другим сотрудникам ИЗМИРАН и Казанского государственного университета, которые

являются соавторами совместно выполненных исследований и принимали участие в обсуждении настоящей работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дана общая характеристика работы. Раскрыта ее актуальность, сформулированы цель работы и основные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна, научная и практическая значимость выполненных исследований. Приведено краткое содержание работы.

**Первая глава** посвящена экспериментальным исследованиям эффектов распространения радиоволн в условиях наклонного воздействия на ионосферу мощным наземным радиоизлучением.

В отличие от изменения параметров ионосферной плазмы мощным вертикальным радиоизлучением на плазменных частотах проблема изменения параметров ионосферной плазмы мощным наклонным радиоизлучением и нелинейного воздействия его на характеристики других волн близких частот к настоящему времени является менее изученной. Об этом свидетельствует обзор литературы и анализ современного состояния вопроса, представленные в разделе 1.2.

Проведенный в разделе 1.2 анализ показал, что в ранних работах не проводились исследования полного цикла работы мощного передатчика при воздействии на ионосферу мощным наклонным радиоизлучением. В подразделе 1.3.1 описаны экспериментальные исследования, позволившие зарегистрировать эффект воздействия мощного наклонного радиоизлучения на верхнюю ионосферу. Серия экспериментов, в постановке, когда обеспечивалось пространственное и частотное совмещение пробного и мощного радиоизлучения [12], проводилась в течении лета 1987 и 1988 гг. в районе Северной Атлантики с использованием научно-исследовательских судов (НИС). Длина трассы изменялась по ходу движения НИС от ~1300 км до ~3000 морских миль (~1700 ÷ ~4500 км), что соответствует односкачковому распространению главной моды сигнала при отражении от *F*-области и одно-двух скачковому распространению при отражении от *E*-слоя.

Проведенная статистическая обработка экспериментальных данных показывает хорошую корреляцию (более чем в 70% случаев) вариаций амплитуды пробного сигнала с моментами работы мощного передатчика.

Проведенный анализ вариаций уровня пробного сигнала после момента включения мощного передатчика при его наклонном воздействии на ионосферу показал, что после включения волны накачки амплитуда пробного сигнала медленно понижается в течении 2-3 минут, затем выходит на ровное «плато» на уровне ниже фоновое примерно на 5-8%. Можно предположить, что при прохождении мощной радиоволны через ионосферу изменяется частота соударений электронов ( $\nu$ ) с ионами и нейтральными атомами. Известно, что величина  $\nu$  растет в нижней и падает в верхней ионосфере. Изменение  $\nu$  под действием мощной волны должно приводить к увеличению поглощения (интегральный эффект) амплитуды слабой волны. Проведенные в [13] оценки поглощения в нижней ионосфере показали, что увеличение поглощения под

действием мощной волны приводит к изменению амплитуды слабой волны на единицы процентов, что хорошо согласуется с приведенными результатами экспериментов.

Примерно через 10-30 сек. после выключения мощного передатчика амплитуда пробного сигнала в течении  $\sim 1,5$  минут увеличивается и достигает уровня, превышающего уровень регулярной (невозмущенной радиоизлучением) ионосферы. После этой фазы в течении  $\sim 3-4$  минут амплитуда пробного сигнала находится практически на одном уровне и затем в течении  $\sim 1,5$  минут резко падает до уровня, обусловленного распространением в невозмущенной ионосфере. Обращают на себя внимание характерные колебания амплитуды пробного сигнала, имеющие частоту  $\sim 0,1$  Гц.

Дальнейшая статистическая обработка экспериментальных данных показала, что резкое уменьшение эффективной мощности излучения мощного передатчика приводит к плавному нарастанию амплитуды пробной волны. При этом при уменьшении  $P_{эфф}$  от  $1P_{эфф}$  до  $0,1P_{эфф}$  наблюдается более сильное воздействие на амплитуду пробного передатчика (увеличение на  $\sim 20 \div 50\%$ ), чем при уменьшении  $P_{эфф}$  от  $1P_{эфф}$  до  $0,25P_{эфф}$  (увеличение до  $11\%$ ).

К заметному влиянию антропогенных воздействий на дальнейшее распространение радиоволн приводит мелкомасштабное расслоение ионосферной плазмы. При нагреве ионосферы вертикальным радиоизлучением эффект детально исследовался в [14, 15]. При воздействии на ионосферу наклонным радиоизлучением по результатам вертикального и наклонного зондирования области возмущения выявлены частотные и фазовые изменения пробных волн, которые могут интерпретироваться как следствие возбуждения искусственных мелкомасштабных неоднородностей. Однако до настоящего времени прямые экспериментальные исследования, доказывающие, что мощное наклонное радиоизлучение инициирует мелкомасштабные неоднородности, не проводились.

В подразделе 1.3.2 представлены результаты экспериментов по рассеянию радиоволн на искусственных мелкомасштабных неоднородностях, инициируемых воздействием на ионосферу мощным наклонным дециметровым радиоизлучением. Модификация ионосферы осуществлялась в дневное время (с 10 до 12 часов МДВ) двумя мощными коротковолновыми передатчиками, расположенными в Московской области. Частоты передатчиков равнялись примерно 12 МГц и различались на 110 кГц. Передающие антенны мощных передатчиков ориентировались на область  $H_e$  - рассеяния радиолинии Москва - Казань (т.е. на область ионосферы на высотах  $\sim 100$  км., в которой выполнены условия зеркального рассеяния радиоволн относительно направления силовых линий геомагнитного поля [15]). На трассе Москва - Казань азимуты излучения в направлении  $H_e$  области равны  $\sim 50^\circ$  и  $\sim 323^\circ$  в пунктах Москва и Казань, соответственно. Углы места равны  $\sim 7 \div 8^\circ$ . Мощность одного из передатчиков накачки была в два раза больше, чем второго. Более мощный передатчик работал циклами: 10 минут - нагрев, 10 минут - пауза. Излучалась немодулированная несущая частота. Второй передатчик излучал постоянно. Поэтому циклы изменения мощности нагрева равнялись: 10 мин -  $P_H = P_{max}$ , 10 мин -  $P_H = 0,33P_{max}$  (где  $P_H$  - мощность нагрева). Вследствие использования та-

кого режима в эксперименте не достигалась полная релаксация искусственно-го возмущения при уменьшении мощности нагрева. Напряженность электро-магнитного поля, создаваемая мощными передатчиками в области  $H_e$  достига-ла уровней  $\sim 360$  мВ/м и  $\sim 250$  мВ/м в течении подциклов накачки соответст-венно. Диагностика ВО ионосферы осуществлялась методом рассеяния ра-диоволн. Передатчики пробного излучения в Московской области работали на частотах  $f_1 \approx 14$  МГц и  $f_2 \approx 25$  МГц. Излучение на этих частотах осуществлялось в том же направлении, что и мощное радиоизлучение. Излучение из Архан-гельска осуществлялось в направлении на Казань на частоте  $f_3 \approx 25$  МГц. В Ка-зани для приема радиосигналов на частотах  $f_2$  и  $f_3$  использовалась фазирован-ная антенная решетка с диаграммой направленности, управляемой в горизон-тальной плоскости. Для приема сигналов на частоте  $f_1 \approx 14$  МГц применялась антенна с круговой диаграммой направленности. Используемая схема экс-перимента позволяла диагностировать модифицированную ионосферу мето-дом ракурсного рассеяния на анизотропных неоднородностях, а также рассея-ния на изотропных неоднородностях на радиолинии Москва - возмущенная область (ВО) - Казань и методом рассеяния на изотропных неоднородностях на радиолинии Архангельск - ВО - Казань.

В результате обработки экспериментального материала был обнаружен эффект уменьшения амплитуды сигнала, рассеянного в ракурсной области трассы Москва - Казань, который может быть вызван несколькими причина-ми. Можно, как это делалось ранее в [14], предположить, что воздействие на ионосферу мощным наклонным радиоизлучением инициирует развитие круп-номасштабной неоднородности, которая в условиях проводившихся экспери-ментов играет роль дефокусирующей линзы. Для геометрии проведенного эксперимента линза должна располагаться ниже высоты образования естест-венных магнитно-ориентированных неоднородностей в среднеширотной об-ласти  $E$ , т.е. ниже  $\sim 100$  км. Другой причиной наблюдавшегося эффекта может быть нелинейное изменение коэффициента поглощения радиоволн в нижней ионосфере, связанное с увеличением электронной температуры  $T_e$  и частоты соударений электронов с нейтральными частицами  $\nu_{en}$  при прохождении че-рез нижнюю ионосферу мощной радиоволны [16]. Оценки показывают, что в интервале высот 70 - 100 км для характерных дневных значений  $\nu_{en} = 4.8 \times 10^4 \div 8.3 \times 10^6$  сек $^{-1}$ , доли энергии, теряемой электроном при соударении  $\delta_f = 2.5 \times 10^{-3}$ , температуры  $T_e = 0.026$  эВ отношение напряженности электриче-ского поля волны накачки на высотах 70 и 100 км при  $P_H = P_{max}$  к внутриплаз-менному полю равно  $E_H/E_p = 0.16 \div 0.2$ . Согласно [8] при этом в нижней ионо-сфере  $T_e$  увеличивается примерно в 1,3 раза, что приводит к увеличению  $\nu_{en}$  на 15%. Для частот пробных волн (ПВ), значительно превосходящих частоту столкновений  $\nu_{en}$  при этом наблюдается увеличение коэффициента поглоще-ния, примерно равное 15%. Т.е. лишь увеличением поглощения ослабление поля ПВ в 1,5 раза нельзя объяснить. Можно полагать, что наблюдавшийся в эксперименте эффект уменьшения амплитуды ПВ в 1,3-1,5 раза при нагреве с максимальной мощностью  $P_H = P_{max}$ , вызывается комбинацией обоих перечис-ленных выше причин. На радиолинии Архангельск - Казань корреляции уров-ня рассеянного сигнала с циклами изменения мощности нагрева не выявлено.



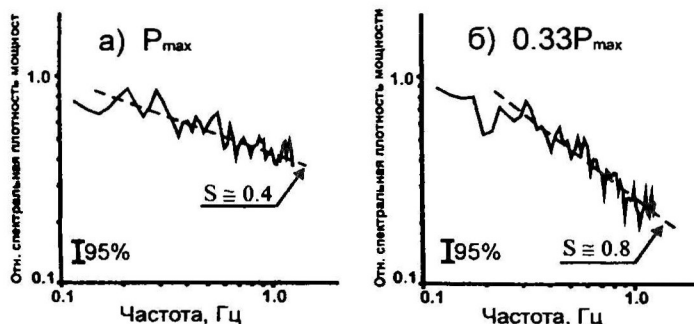


Рис. 1. Спектры флуктуаций амплитуды рассеянного сигнала на частоте 14 МГц.

Более чувствительным методом выделения искусственных возмущений является исследование частотного спектра. На рис. 1(а, б) представлены спектры флуктуаций амплитуды рассеянного сигнала на частоте 14 МГц. Результаты получены путем усреднения данных по нескольким циклам изменения мощности нагрева. Вертикальным отрезком на рисунке указан 95% доверительный интервал измерения. В высокочастотной части спектр может быть аппроксимирован обратно-степенной зависимостью  $F_a(\nu) \propto \nu^{-S}$  (где  $\nu$  - частота) с показателем степени  $S$ , зависящим от мощности накачки. Аппроксимация спектра этой функцией представлена на рис. 1(а, б) пунктирной линией. В случае использования максимальной мощности нагрева  $P_H = P_{max}$   $S \approx 0,4$ , для  $P_H = 0,33P_{max}$   $S \approx 0,8$ . Т.е. при увеличении мощности нагрева происходит уменьшение параметра  $S$ , что может интерпретироваться как увеличение интенсивности мелкомасштабных флуктуаций электронной плотности.

В разделе 1.4 сформулированы основные результаты, полученные в первой главе диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным исследованиям влияния регулярной (невозмущенной) ионосферы на распространение радиоволн дециметрового диапазона.

Исследования по модификации ионосферных параметров мощным наклонным радиоизлучением проводились на стандартных радиосредствах. Т. е. не создавалось специализированных антенно-фидерных и передающих радио систем, а использовались средства, принадлежащие радиовещательным компаниям. Тем не менее, были получены значительные (в разы [3]) эффекты изменения параметров ионосферной плазмы.

Околоземная ионосфера испытывает на себе все возрастающее воздействие больших потоков электромагнитной энергии, излучаемых наземными радиотехническими системами, работающими в режиме наклонного зондирования на частотах, превышающих плазменные. Мощности радиовещательных станций КВ диапазона постоянно растут, и используемые в экспериментах по воздействию на ионосферу наклонным радиоизлучением мощности не мно-



го превышают используемые для радиовещательных целей. В связи с этим становится понятным, что для более надежного выявления, анализа и интерпретации эффектов, наблюдающихся в экспериментах по искусственной модификации параметров ионосферной плазмы, необходимы исследования закономерностей распространения коротких радиоволн при наличии в ионосфере Земли возмущений, обусловленных регулярными явлениями (солнечным терминатором, различными волновыми процессами и т.п.). В том числе необходим учет уровня электромагнитного фона (ЭМФ) в регионе, где проводятся подобные экспериментальные исследования, так как нелинейные эффекты в ионосферной плазме, возникающие при распространении мощных декаметровых волн, могут ограничивать рост уровня сигнала в точке приема при увеличении мощности передатчиков и порождают дополнительные возмущения в среде распространения радиоволн [17].

Исследования ЭМФ представляются важными и с точки зрения экологии среды обитания человека, т. к. даже слабые электромагнитные поля оказывают воздействие на человеческий организм.

В разделе 2.1 описана структура ионосферы и дан краткий обзор процессов, влияющих на динамику ионосферной плазмы в регулярных (невозмущенных радиоволнами) условиях.

В разделе 2.2 рассмотрен автоматизированный приемный комплекс (АПК) для исследований характеристик радиоволн КВ диапазона, распространяющихся через ионосферу, который был разработан в ИЗМИРАН при участии автора. Детально описана блок-схема АПК. Приводятся расчеты узкополосного (полоса пропускания ~30 Гц) фильтра основной селекции (ФОС), разработанного в ИЗМИРАН совместно с Агафонниковым Ю. М. для приемников Р399А «Катран». Описан алгоритм работы АПК.

В разделе 2.3 приводятся экспериментальные исследования амплитудно-фазовых характеристик, которые проводились на базе АПК, располагавшегося в г. Троицке на территории ИЗМИРАН. Антенно-фидерная система состояла из двух вертикальных вибраторов. Осуществлялась одновременная регистрация на двух частотах на трассах различной протяженностью. На трассе Лондон – Москва (ИЗМИРАН) протяженностью ~2500 км использовались сигналы вещательной станции ВВС на частоте  $f=12095$  кГц. На короткой трассе (~70 км) осуществлялся прием радиостанций сигналов точного времени РВМ на частоте  $f=4996$  кГц. Рабочие частоты и геометрия двух рассматриваемых трасс выбраны так, чтобы точки отражения были расположены в F-области ионосферы и разнесены на достаточно большое расстояние, равное - 1400 км. Такая постановка экспериментов позволила исследовать широкомасштабные динамические процессы в ионосфере.

Регулярные измерения проводились в течение двух лет (1991-1993 гг.) круглосуточными сеансами один раз в месяц. Длительность сеанса регистрации составляла 51,2 секунды, частота дискретизации принимаемых сигналов равнялась 20 Гц (т.е. всего за один сеанс регистрации снималось 1024 отсчета).

Было показано, что спектральные характеристики принимаемых сигналов могут иметь следующие особенности: уширение спектра (в основном, в

ночное время суток), доплеровский сдвиг частоты (утренние и вечерние периоды), линейчатый характер спектра. На рис. 2 представлены примеры характерных спектров сигналов, полученных для дневного (а) и ночного (б) времени суток на трассе протяженностью ~70 км РВМ – Троицк ( $f_p = 5$  МГц).

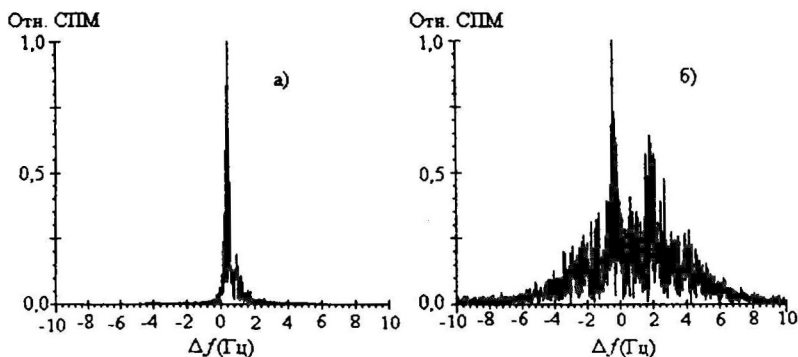


Рис. 2. Спектр сигналов полученных на трассе РВМ – г. Троицк 22.01.1993 г. По оси абсцисс отложена полоса обзора  $\pm 10$  Гц, по оси ординат относительная спектральная плотность мощности (СПМ). а) 08:02 местного времени (LT 30°E); б) 23:32 местного времени (LT 30°E).

В ночное время структура спектра приобретает диффузный характер, и он может занимать практически всю исследуемую полосу частот. Как правило, в это же время суток в спектрах сигнала наблюдается наличие нескольких узкополосных компонент с различными центральными частотами (линейчатый характер спектров рис. 2(б)). В дневное время на обеих исследуемых трассах наблюдается, как правило, одна компонента сигнала (рис 2 (а)). В восходно-заходные периоды наблюдаются волнообразные изменения доплеровских смещений частоты с изменениями знаков, увеличением амплитуды и расширением спектров сигналов. Проведенный анализ экспериментальных данных для всех сезонов года показал, что в зимний период, когда критические частоты  $f_oF_2$  – слоя для среднеширотной ионосферы максимальны, наблюдается наибольшее доплеровское смещение частоты, которое на исследуемых трассах может достигать  $+(2,5 \pm 3)$  Гц в восходный и  $-(0,7 \pm 1,5)$  Гц в заходный периоды. Для летнего сезона, когда Солнце на высотах F-слоя практически не заходит, вариации  $f_oF_2$  и  $h_pF_2$  для среднеширотной ионосферы минимальны, наблюдается наименьшие доплеровские смещения частоты ( $+1$  Гц на восходе;  $-0,5$  Гц на заходе Солнца). В равноденственные периоды (весенний и осенний сезоны) смещения доплеровской частоты могут достигать  $+1 \pm 2,5$  Гц на восходе и  $-0,5 \pm 0,7$  Гц на заходе Солнца.

Наряду с доплеровским смещением частот наблюдается и расширение спектра принимаемых сигналов, которое так же носит периодический характер. Расширение спектра принимаемых сигналов наблюдается в основном в

ночное время суток, что скорее всего связано с изменением механизма распространения радиоволн на исследуемых трассах. При распространении по стандартной траектории вдоль дуги большого круга (дневное время) мы наблюдаем небольшое спектральное уширение принимаемых сигналов ( $\sim 0,1 \div 0,2$  Гц). В ночное время, когда рабочие частоты на исследуемых трассах близки или превышают максимально применимые частоты (МПЧ), увеличивается роль рассеяния на ионосферных неоднородностях, что приводит к значительному уширению спектра принимаемых сигналов. Уширение может достигать десятков герц (по уровню не менее 0,1 от максимума относительной спектральной плотности мощности СПМ) и занимать практически всю исследуемую полосу частот (20 Гц). Расширение спектра сигналов на трассе Лондон - Троицк в среднем на 25-30 % больше, чем на трассе РВМ - Троицк.

По уширению спектров принимаемых радиосигналов была определена  $\sqrt{V^2} = \sigma_r$  - среднеквадратичная скорость рассеивающих неоднородностей. Для этого было получено выражение связывающее уширение спектра принимаемых сигналов с среднеквадратичной скоростью рассеивающих неоднородностей:

$$\sigma_r = \frac{c \cdot \Delta f}{2\sqrt{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot f_p} \quad (1)$$

Здесь  $c$  - скорость распространения электромагнитных волн в свободном пространстве,  $\Delta f$  - уширение спектра принимаемых сигналов на уровне  $e^{-1}$ ,  $f_p$  - рабочая частота,  $\theta$  - угол рассеяния.

В результате расчетов по выражению (1) было получено: в дневные часы (с 8 до 16 часов) величина  $\sigma_r$  не превышает нескольких метров в секунду для всех сезонов года; в осенне-зимний период для ночных часов суток эта величина может достигать нескольких сотен метров в секунду; в весенне-летний сезон среднеквадратичная скорость рассеивающих неоднородностей в ночное время составляет несколько десятков метров в секунду.

В разделе 2.4 приводятся экспериментальные исследования электромагнитного фона (ЭМФ) в КВ диапазоне для Московского региона.

С ноября 1991 г. по январь 1994 г. был проведен цикл регулярных ежемесячных измерений уровня ЭМФ. Измерения проводились раз в месяц круглосуточно через каждые полчаса в диапазоне частот 1÷32 МГц с шагом 10 кГц. Полоса пропускания на приемнике устанавливалась равной 10 кГц.

Для удобства анализа экспериментальных данных исследуемый диапазон частот был разделен на 5 поддиапазонов: 1) 1÷5 МГц, 2) 5÷10 МГц, 3) 10÷15 МГц, 4) 15÷20 МГц, 5) более 20 МГц, в каждом из которых была измерена интегральная мощность электромагнитного поля  $P_{ЭМФ}$  на входе приемника. Была исследована корреляция уровня ЭМФ с состоянием ионосферы и магнитного поля Земли. Для проведения такого анализа были использованы результаты ионозондовых измерений в п. Троицк и данные из каталогов. Оценивалась связь наблюдаемых изменений уровня ЭМФ с критическими частотами различных ионосферных слоев ( $f_oF2$ ,  $f_oF1$ ,  $f_oE$ ), параметрами спорадического слоя  $E_s$ , наименьшей наблюдаемой частотой и  $K_p$  - индексом возмущенности

магнитного поля. Весь массив экспериментальных данных был разделен по сезонам. Корреляция уровня ЭМФ с ионосферными параметрами оценивалась по методике, описанной в [18].

В таблице 1 приведены среднегодовые значения коэффициентов корреляции критических частот слоев  $f_oE$ ,  $f_oF1$ ,  $f_oF2$  и  $f_oE_s$  с интегральными значениями мощности ЭМФ в различных частотных интервалах.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции уровня ЭМФ с критическими частотами ионосферных слоев.

$f(\text{МГц})$	1÷5	5÷10	10÷15	15÷20	>20
$f_oF2$	-0,4	-0,2	0,2	0,6	0,4
$f_oF1$	-0,3	-0,5	-0,6	~ 0	-0,1
$f_oE$	-0,3	-0,54	-0,2	~ 0	0,2
$f_oE_s$	-0,5	-0,5	-0,1	0,14	0,2

Как следует из таблицы 1, наибольшее влияние на уровень ЭМФ оказывает критическая частота ионосферного слоя  $F2$ .

В таблице 2 приведены значения коэффициентов корреляции  $r$  и корреляционного числа Равера  $R$  [18] между  $f_oF2$  и  $P_{\text{ЭМФ}}$  для каждого из исследуемых диапазонов частот для различных сезонов.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции  $f_oF2$  и  $P_{\text{ЭМФ}}$ .

Весна					
$f(\text{МГц})$	1÷5	5÷10	10÷15	15÷20	>20
$r$	-0,3	-0,3	0,1	0,6	0,5
$R$	-0,6	-0,6	0,3	0,9	0,7
Лето					
$r$	-0,1	-0,2	0,3	0,2	0,2
$R$	-0,3	-0,1	0	0,2	0,3
Осень					
$r$	-0,5	-0,4	0,2	0,8	0,3
$R$	-0,6	-0,4	0,2	0,9	0,5
Зима					
$r$	-0,5	-0,5	0,3	0,7	0,7
$R$	-0,7	-0,9	0,6	0,8	0,6

Наибольшее влияние на уровень ЭМФ оказывает состояние слоя  $F2$ , при этом максимальные значения корреляции с критической частотой  $f_oF2$  зарегистрированы в диапазоне частот 15 ÷ 20 МГц. По таблицам 1 и 2 обнаруживается тенденция к увеличению корреляции с увеличением частоты, что можно интерпретировать как следствие уменьшения поглощения в нижней ионосфере при росте частоты. Этим же можно объяснить рост отрицательной корреляции при уменьшении частоты.

В разделе 2.5 Сформулированы основные результаты и выводы, полученные во второй главе.

**Третья глава** посвящена исследованию особенностей изменения ионосферного канала распространения декаметровых радиоволн в условиях сезонной перестройки субавроральной ионосферы и их обусловленности, а также проведению анализа модельных представлений ионосферы (СМИ-88, IRI-89, РМИ-81) и их сравнению с экспериментальными данными, полученными из разных источников и разными методами.

Ряд экспериментов по воздействию мощным наклонным радиоизлучением на ионосферу был проведен в динамичных геофизических условиях авроральной и субавроральной ионосферы. Эту динамику необходимо учитывать при постановке таких экспериментальных исследований, а также при анализе получаемых данных. В то же время постановка экспериментов по воздействию на ионосферу мощным наклонным радиоизлучением требует больших организационных и материальных затрат. Поэтому, как с точки зрения планирования, постановки и проведения таких экспериментов, так и с точки зрения интерпретации полученного материала, в расчетах параметров радиоволн, особенно на радиопереносных в условиях изменчивой ионосферы высоких широт, необходимо использование максимально адекватных геофизическим условиям моделей ионосферы.

**Раздел 3.2** посвящен экспериментальным исследованиям эффектов суббурь по ионограммам наклонного зондирования (НЗ) ионосферы.

В сентябре 1989 г. в ходе экспериментов по исследованию особенностей распространения радиоволн в условиях искусственно возмущенной ионосферы мощным наклонным радиоизлучением на научно-исследовательском судне (НИС) «Проф. Визе» была проведена регистрация дистанционно-частотных характеристик сигналов наклонного зондирования ионосферы (ионограмм НЗ [A24]). Измерения выполнялись с целью изучения динамики околоземной ионосферной плазмы для задач повышения эффективности использования излучающих радиотехнических систем в сложных условиях субавроральной и авроральной ионосферы. Ионограммы регистрировались круглосуточно по шесть сеансов в течении одного часа на трех радиотрассах различной широтной ориентации: Москва - НИС, С.- Петербург - НИС, о. Хейса - НИС. Измерения проводились в период нахождения НИС «Проф. Визе» в районе  $\varphi=69-75^\circ N$ ,  $\lambda=(0\pm 7)^\circ$  на трассах, протяженность которых составляла  $\sim 2300$ ,  $\sim 1600$  и  $\sim 1700$  км соответственно. Дополнительно для проведения более полного анализа были использованы экспериментальные данные еще по двум трассам: Москва - С.- Петербург ( $\sim 700$  км) и о. Хейса - С.- Петербург ( $\sim 2500$  км).

Был проведен совместный анализ изменений максимальных и наименьших наблюдаемых частот (МНЧ и ННЧ), зарегистрированных в период с 5 по 23 сентября 1989 г., и их сравнение с прогнозными значениями максимально применимых частот, построенными для каждых суток и трасс.

В отдельные дни обнаруживались одновременные противофазные по широте вариации исследуемых параметров ионограмм НЗ. Так, 11 сентября на трассе о. Хейса - НИС на фоне общего роста МНЧ в утренние часы происходит локальное уменьшение ее в 7.00 час. на  $\Delta f \sim 10$  МГц, в то время как на трассе С.- Петербург - НИС в этот период регистрируется уменьшение МНЧ в 5.00 и 9.00 час. и увеличение в 7.00 час. Следует заметить, что вместе с изме-

нениями абсолютного значения и знака этих вариаций обнаруживалась асимметрия суточного хода МНЧ, ННЧ, а также вариации величины  $\Delta f = \text{МНЧ} - \text{ННЧ}$ . Последние, в конечном счете, характеризуют диапазон частот, проходящих через исследуемый канал распространения (эффективная ширина канала). Наиболее значимые вариации этой величины  $\Delta f$  наблюдались в переходное время суток, причем, как правило, если ширина канала  $\Delta f$  увеличивалась в вечерние часы, то в утренние - уменьшалась. Дополнительно в изменениях этого параметра (ширины канала) проявились «пучности», «узлы» и смещение «узлов» по оси времени. Эффективная ширина канала распространения 15 сентября уменьшалась до нуля, что соответствует полному вырождению канала распространения. Самые большие отклонения наблюдались в 7.00 - 8.00 и 19.00 - 20.00 час.

Важно отметить, что такие противофазные изменения МНЧ и ННЧ, когда наблюдались «узлы», имели периоды, равные 12 и 24 часам.

Проведенный анализ гелиогеофизических условий и результатов экспериментов позволяет предположить, что выделенные особенности вариаций МНЧ и ННЧ на указанных радиотрассах 5, 9-11, 16-17, 18-19, 22-23 сентября могли быть связаны с изменениями параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и в первую очередь его направления. Действительно, если наибольшие значения МНЧ и отклонения их от прогнозируемых для 5 и 19 сентября, казалось бы, можно было связать с результатами действия солнечных вспышек и их последствиями, то в другие дни 9-11, 16, 17 и 23 сентября такая связь не обнаруживается, и более того 11 и 23 сентября магнитная активность Земли была невозмущенной. Большие положительные изменения  $\Delta f$  МНЧ на высокоширотных трассах коррелированы с пересечением «благоприятных» от (+) к (-) ( $B_z < 0$ ) границ МП, возникновением отрицательных суббурь и увеличением значений глобального  $K_p$ -индекса [18]. Отрицательные изменения имели меньшую величину по сравнению с положительными и, как правило, наблюдались в моменты увеличения положительных изменений, но для других трасс. Было обнаружено, что отрицательные изменения  $\Delta f$  наблюдаемых частот увеличивались по амплитуде в моменты с противоположными («неблагоприятными») направлениями магнитного поля Солнца. Например, 5 сентября на трассе о. Хейса - НИС наблюдались большие положительные изменения МНЧ, на трассе Москва - НИС - незначительные, а на трассе о. Хейса - С.-Петербург - отрицательные изменения. Аналогичные вариации на различных широтах наблюдались 11 и 16 сентября.

В разделе 3.3 проведен сравнительный анализ модельных представлений ионосферы для задач распространения радиоволн в высоких широтах.

Точность прогноза параметров радиоволн на радиолиниях в условиях изменчивой ионосферы высоких широт определяется, прежде всего, использованием в расчетах максимально адекватных геофизическим условиям моделей ионосферы. Для сравнительного анализа были использованы Международная модель ионосферы (IRI-89), Справочная модель ионосферы (СМИ-88) и Глобальная аналитическая равноденственная модель ионосферы (РМИ-81).

С помощью модельных описаний (РМИ-81, IRI-89, СМИ-88) были построены профили зависимости электронной концентрации ионосферы от вы-

соты ( $n_e(h)$ ) для геомагнитных широт от 45 до 90° N вдоль долгот 180° и 300° E в интервале высот 80-1000 км. Полученные профили  $n_e(h)$  сравнивались с эмпирическими данными высокоширотной ионосферы, содержащимися в описании модели РМИ-81, с данными вертикального и наклонного зондирования ионосферы и с данными спутников «Интеркосмос-19» и «Космос-900». Сравнения проводились для минимального ( $R_z=10$ ) и максимального ( $R_z=100$ ) уровня Солнечной активности. Также проанализирована динамика широтно-долготных положений ночных высокоширотных провалов электронной концентрации в D, E и F областях ионосферы и электронной концентрации на высоте 400 км.

Проведенный анализ показал, что в невозмущенных условиях, особенно в дневное время, рассмотренные модели дают близкие значения  $n_e(h)$  и расхождения с экспериментом не превышают 50%. В утренне-вечернее, ночное время и при возмущениях наиболее полное описание высокоширотных особенностей дает модель СМИ-88. Однако сравнение прогнозных значений СМИ с экспериментальными профилями по конкретным дням в отдельных случаях указывает на большие расхождения по  $n_e(h)$  в области главного ионосферного провала. Это, по-видимому, может быть обусловлено недостаточной точностью задания в модели широтно-долготной локализации провалов в ночные часы. Как показали сравнения, расхождения в определении положений провалов по исследуемым моделям могут достигать до 6° по широте в обоих полушариях. Представляется важным отметить, что модели не отражают обнаруженный в эксперименте факт наличия несовпадения времени реально наблюдаемого физического терминатора и его смещения при изменениях магнитного поля Солнца с прогнозируемым моментом наступления оптического терминатора на высоте отражения радиоволн в ионосфере.

В разделе 3.4 сформулированы основные выводы третьей главы.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ экспериментальных данных, полученных при воздействии мощным наклонным радиоизлучением на субавроральную ионосферу в условиях постановки эксперимента с пространственным и частотным совмещением пробного и мощного радиоизлучения. Проанализирован полный цикл работы мощного передатчика. Выявлена высокая корреляция (более 70 % случаев) вариаций амплитуды пробного сигнала с циклами работы мощного передатчика. Получены характерные изменения амплитуды пробных радиоволн после включения и выключения мощного передатчика. Обнаружен эффект ослабления амплитуды пробных волн (ПВ) в течении ~2-3 минут на ~5-8 % относительно уровня, обусловленного распространением в невозмущенной ионосфере, после включения возмущающего ионосферу радиоизлучения. Через 10-30 сек. после выключения мощного передатчика амплитуда ПВ в течении 1-1.5 минуты увеличивается и достигает уровня, превышающего уровень характерный для регулярной (невозму-



щенной радиоизлучением) ионосферы. При изменении эффективной мощности возмущающего передатчика ( $P_{эфф}$ ) от  $1,0P_{эфф}$  до  $0,1P_{эфф}$  наблюдается более сильное воздействие на амплитуду ПВ (увеличение на ~20-50 %), чем при переходе  $P_{эфф}$  от 1,0 до 0,25 (увеличение до 11 %). После этой фазы в течении ~3÷4 минут амплитуда ПВ находится практически на одном уровне, и затем, в течении ~1÷1,5 минуты спадает до уровня, обусловленного распространением ПВ в невозмущенной мощным радиоизлучением ионосфере.

2. Проведен анализ экспериментальных данных, полученных в ходе экспериментов на среднеширотной радиолинии по рассеянию радиоволн мелкомасштабными ионосферными неоднородностями инициированными воздействием на ионосферу мощным наклонным радиоизлучением. Обнаружен эффект уменьшения амплитуды пробных волн (ПВ) в 1,3÷1,5 раза, что может быть объяснено увеличением поглощения в нижней ионосфере при ее нагреве (по оценкам до 15 %) и развитием в нижней ионосфере крупномасштабной дефокусирующей линзы. Проведены исследования частотного спектра флуктуаций амплитуды ПВ, коррелированные с циклами изменения мощности нагрева ионосферы. Показано, что в высокочастотной части спектр может быть аппроксимирован обратно-степенной зависимостью  $F_a(\nu) \propto \nu^{-S}$  (где  $\nu$  - частота) с показателем степени  $S$ , зависящем от мощности волны накачки. В случае использования максимальной мощности нагрева  $P_n = 1,0P_{max}$   $S \approx 0,4$ , для  $P_n = 0,33P_{max}$   $S \approx 0,8$ . Т. е. при увеличении мощности нагрева происходит уменьшение параметра  $S$ , что можно интерпретировать как следствие увеличения интенсивности мелкомасштабных флуктуаций электронной плотности в ионосфере.
3. Измерены амплитудно-фазовые характеристики радиосигналов, принимаемых на двух пространственно разнесенных трассах различной протяженности в условиях регулярной (невозмущенной искусственными воздействиями) ионосферы. Построен среднесуточный ход доплеровских смещений частоты для различных сезонов. По среднесуточному ходу уширения спектров принимаемых радиосигналов получены характерные значения среднеквадратичной скорости рассеивающих неоднородностей.
4. Измерены сезонно - суточные вариации уровня электромагнитного фона (ЭМФ) в диапазоне частот 1÷32 МГц и выявлена их связь с состоянием ионосферы. Показано, что наибольшее влияние на уровень ЭМФ оказывает состояние слоя  $F_2$ . Максимальные значения корреляции с критической частотой  $f_oF_2$  получены в диапазоне частот 15 ÷ 20 МГц. Обнаружена тенденция к увеличению корреляции с увеличением частоты, что можно интерпретировать как следствие уменьшения поглощения в нижней ионосфере при росте частоты, а также рост отрицательной корреляции при уменьшении частоты, что можно объяснить увеличением поглощения в нижней ионосфере.
5. Выполнен анализ особенностей изменения ионосферного канала распространения декаметровых радиоволн в условиях сезонной перестройки субавроральной ионосферы на пяти радиолиниях различной протяженности и



ориентации. Показано, что отклонения полученных в ходе экспериментов максимально наблюдаемых частот (МНЧ) от рассчитанных максимально применимых частот (МПЧ) в среднем составляют 5-40%. Однако в отдельные дни и особенно в утренне-ночные часы (в 2.00-8.00 час.) они могут достигать значений +150 %. Отклонения экспериментально полученных значений МНЧ и наименьших наблюдаемых частот (ННЧ) от прогнозируемых МПЧ наблюдались как в одну, так и в другую сторону. Причем отрицательные отклонения, как правило, по абсолютной величине оказывались меньше, чем положительные, и наблюдались в большинстве случаев в одних и тех же моменты, что и положительные, но на других пространственно-разнесенных трассах. Совместный анализ суточных вариаций эффективной ширины ионосферного канала распространения радиоволн, определенной как разность между МНЧ и ННЧ ( $\Delta f = \text{МНЧ} - \text{ННЧ}$ ) и анализ гелиогеофизических условий проведения экспериментов, позволил выявить ранее неизвестный эффект контроля межпланетным магнитным полем частотной ширины ионосферного канала радиосвязи в декаметровом диапазоне с субавроральной ионосферой. Последнее свидетельствует о необходимости учета состояния межпланетного магнитного поля в проблеме моделирования и прогнозирования ионосферных условий и характеристик распространения радиоволн.

6. Проведено сравнение моделей ионосферы (СМИ-88, IRI-89, РМИ-81) с экспериментальными данными. Показано, что в невозмущенных условиях, особенно в дневное время, рассмотренные модели дают близкие значения высотного профиля электронной концентрации и расхождения с экспериментом не превышают 50%. В утренне-вечернее, ночное время и при возмущениях наиболее полное описание высокоширотных особенностей дает модель СМИ-88. Все рассмотренные модели ионосферы не отражают обнаруженный в эксперименте факт наличия несовпадения времени реально наблюдаемого физического терминатора и его смещения при изменениях магнитного поля Солнца с прогнозируемым моментом наступления оптического терминатора на высоте отражения радиоволн в ионосфере.

**Основные публикации по теме диссертации.**

- A1. V. N. Egorova, I. A. Nasyrov, T. N. Soboleva. IRI electron density analytical model and its comparison with empirical data and high latitude models //Advances in Space Research. – 1995. - V.16, No 1. – P. 47-50
- A2. A. M. Nasyrov, I. A. Nasyrov, G. S. Bochkarev. The development of the small-scale irregularities in the ionosphere disturbed by a powerful oblique HF radiowaves //Advances in Space Research. – 1998. – V. 21, No 5. - P. 701-704.
- A3. А. М. Насыров, И. А. Насыров, Ю. М. Агафонников, Ю. Н. Черкашин. Связь уровня электромагнитного фона в декаметровом диапазоне с состоянием ионосферы //Сб. докладов II Международного симпозиума, ЭМС-97. - С.- Петербург, 1997. - С. 91-94.
- A4. Г. С. Бочкарев, Л. В. Егорова, Ю. Н. Комолов, И. А. Насыров, Т. Н. Соболева. Эффекты суббурь по ионограммам наклонного зондирования ионосферы в сентябре 1989 года //Геомагнетизм и аэрономия. – 1995. - Т.25, №1. - С. 196-201.

- A5. Г. С. Бочкарев, А. М. Насыров, И. А. Насыров. Распространение КВ в ионосфере, возмущенной мощным наклонным радиоизлучением //Сборник докладов Всероссийская научно-техническая конференция «Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация». – Воронеж, 1997. - Т. 1. - С. 10-15.
- A6. Ю. М. Агафонников, А. М. Насыров, И. А. Насыров, Ю. Н. Черкашин. Исследования уровня электромагнитного фона в диапазоне частот 1-32 МГц и его связей с гелио-геофизическими факторами //Сборник докладов 4-ой Российской научно-технической конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов» (ЭМС-96) - С.-Петербург, 1996. - С. 202-204.
- A7. Ю. М. Агафонников, А. М. Насыров, И. А. Насыров, Ю. Н. Черкашин. Вариации частотного спектра при распространении КВ на трассах различной протяженности //Сборник докладов 5-ой Российской научно-технической конференции «Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов» (ЭМС-98). - С.-Петербург, 1998. - С. 55-57.
- A8. Г. С. Бочкарев, В. Н. Егорова, И. А. Насыров, Т. Н. Соболева. Сравнительный анализ модельных представлений ионосферы для задач распространения радиоволн в высоких широтах //В Междугосударственном сборнике «Проблемы распространения и дифракции электромагнитных волн». – М.; МФТИ, 1995. - С. 150-154.
- A9. Г. С. Бочкарев, В. Н. Егорова, И. А. Насыров, Т. Н. Соболева. Анализ модельных представлений ионосферы для задач распространения радиоволн в высоких широтах //XVII Всероссийская конференция “Распространение радиоволн” (С.Петербург, 1996). – Москва, 1996. -Тезисы докладов, ч. 2. - С. 386.
- A10. Ю. М. Агафонников, Г. С. Бочкарев, Т. Н. Соболева, Ю. Н. Черкашин, А. М. Насыров. И. А. Насыров. Влияние динамических процессов в ионосфере на частотные спектры дециметровых радиоволн. //52-я Научная сессия общества им. А.С. Попова. - Москва, 1997. - Тезисы докладов, ч.1. - С. 199-200.
- A11. Г. С. Бочкарев, А. М. Насыров, И. А. Насыров. Развитие искусственных мелкомасштабных неоднородностей при модификации ионосферы мощным наклонным радиоизлучением //XVII Всероссийская конференция “Распространение радиоволн” (С.Петербург, 1996). – Москва, 1996. -Тезисы докладов, ч. 1. - С. 135-136.
- A12. I. A. Nasyrov, A. M. Nasyrov, G. S. Bochkarev. Field-aligned scattering from a region of the ionosphere modified by a powerful oblique HF radiation. //XXVth General Assembly URSI (Lille, France). Abstracts. – 1996. - P. 709.
- A13. I. A. Nasyrov, A. M. Nasyrov, G. S. Bochkarev. The development of the small - scale irregularities in the ionosphere disturbed by powerful oblique HF radio waves //31th COSPAR Scientific Assembly, Abstracts. - The University of Birmingham, England, 1996. - P. 235
- A14. И. А. Насыров. Воздействие на ионосферу наклонным КВ радиоизлучением большой мощности. //II Республиканская научная конференция мо-

- лодых ученых и специалистов. – Казань, 1996. – Тезисы докладов, кн. 3: Физико-математические науки. – С. 85.
- A15. И. А. Насыров. Спектральные характеристики КВ распространяющихся в ионосфере, возмущенной мощным наклонным декаметровым радиоизлучением //Труды XI Всероссийской школы-конференции по дифракции и распространению радиоволн. – М.: МГУ, 1998. – С. 234-235.
- A16. Egorova V. N., Nasyrov I. A., Soboleva T. N. Analytical model of electron concentration IRI-85 and its comparison with experimental data and high latitude models //30th COSPAR Scientific Assembly, II. Abstracts. - Hamburg, Germany, 1994. - P. 95.
- A17. G. S.Bochkarev, I. A. Nasyrov, Yu. A. Chernov. Some results of experiments on the ionosphere modification of the powerful oblique HF radiation in summer 1987-88 //IV Suzdal URSI Symposium on Artificial Modification of the Ionosphere (Abstracts). - Uppsala, Sweden, 1994. - P. 33
- A18. T. N.Soboleva, I. A. Nasyrov, L. N. Novicova, V. D. Ozerov, G. L. Gdalevich Dynamic and modelling of concentration troughs //30th COSPAR Scientific Assembly, II. Abstracts. - Hamburg, Germany, 1994. - P.92.
- A19. Yu. M. Agafonnikov, G. S. Bochkarev, I. A. Nasyrov, Yu. N. Cherkashin. B. E. Lyannoi. The effect of the substorm in the Ionosphere 24 june 1993 //Annales Geophysicae, part III, Space & Planetary Sciences, Supplement III - 1995. - V. 13. - P. 686.
- A20. Yu. M. Agafonnikov, G. S. Bochkarev, I. A. Nasyrov, Yu. N.Cherkashin, T. N. Soboleva. Dynamics processes in the ionosphere obtained by the determination of the frequency spectra of the decameter waves //Annales Geophysicae, part III, Space & Planetary Sciences, Supplement III - 1995. - V. 13. - P. 642.
- A21. Г. С. Бочкарев, В. Н. Егорова, И. А. Насыров, Т. Н. Соболева. Сравнительный анализ модельных представлений ионосферы для задач распространения радиоволн //Международная конференция «100-летие начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождения радиотехники». - 1995. - Тезисы докладов, ч. III. - С. 55.
- A22. А. М. Насыров, И. А. Насыров, Ю. М. Агафонников, Ю. Н. Черкашин. Сезонно- суточные вариации уровня электромагнитного фона в диапазоне частот 1-32 МГц //Международный симпозиум “Мониторинг окружающей Среды и проблемы Солнечно - Земной физики” посвященный 60-летию регулярных ионосферных исследований. – Томск, 1996. - Тезисы докладов. - С. 94-95.
- A23. А. М. Насыров, И. А. Насыров, Ю. М. Агафонников, Ю. Н. Черкашин. Доплеровские вариации частоты при ионосферном распространении КВ. //XIX Всероссийская конференция «Распространение радиоволн». - Казань, 1999. - Тезисы докладов. - С. 126-127.
- A24. Г. С. Бочкарев, Л. В. Егорова, Ю. Н. Комолов, И. А. Насыров, Т. Н. Соболева, И. А. Шумилов. Эффекты суббурь в сентябре 1989 года по данным корабельных наблюдений эффектов распространения радиоволн в ионосфере //XI.VIII Научная сессия, посвященная дню радио. - М.: 1993. - Тезисы докладов. - С. 91.

- A25. Ю. М. Агафонников, В. Г. Еремеев, И. А. Насыров, Ю. Н. Черкашин. Некоторые результаты экспериментальных наблюдений радио- сигналов в диапазоне частот 1-32 МГц //Тезисы докладов XVII Всероссийской конференции "Распространение радиоволн". - Ульяновск, 1993. - Секция №9. - С.65.
- A26. Г. С. Бочкарев, В. А. Еременко, В. В. Мигулин, И. А. Насыров, Ю. Н. Черкашин, Ю. К. Калинин, А. У. Жильцов, Ю. А. Чернов, Н. Ф. Благовещенская, И. А. Шумилов, П. М. Нагорский, Ю. Н. Тарашук. Радиофизические проявления воздействия на ионо-сферу мощным наклонным радио- излучением //Тезисы докладов XVII Всероссийской конференции "Распространение радиоволн". - Ульяновск, 1993. - Секции №№ 6, 7, 8. - С. 6-7.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Мясников Е. Н. и др. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) //Известия вузов: радиофизика. – 1987. - Т. 30, № 2. - С. 208 – 225.
2. Utlaut W. F. An ionospheric modifications experiment using very high power, high frequency transmission //J. Geophys. Res. - 1970. - V. 75. - P. 6402-6405.
3. Bochkarev G. S. Influence of the ionosphere modified by powerful oblique radiowaves on HF radio wave propagation. //Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. - 1997. - V. 59, No 18. - P. 2295-2304.
4. Bailey V. A. On the attachment of electrons to gas molecules //Phil. Mag. - 1925. - V. 50. - P. 825-843.
5. Гинсбург В. Л., Гуревич А. В. Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле //Успехи физ. наук. - 1960. – Т. 70. - С. 201-246; 393-428.
6. Farley D. T. Artificial heating of the electrons in the F-region of the ionosphere //J. Geophys. Res. - 1963. - V. 68. - P. 401-413.
7. Meltz G. and Le Levier R. E. Heating the F-region by deviative absorption of radio waves //J. Geophys. Res. – 1970 - V. 75. - P. 6406-6416.
8. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. - М.: Наука, 1973. - 272 с.
9. Klos Z., Kiraga A., Pulniet S. A. Board-band Hectometric Emission in the Top-side Ionosphere Created by Ground-based Transmitter //Adv. Space Res. – 1990. – V. 10, No 7. – P. (7)177-(7)180.
10. Baranov V. A., Lopatnikov S. L. and Cherkashin Yu. N. Radio Wave Propagation and Plasma Nonstability in the Ionosphere and Magnetosphere //Radio Waves Propagation of HF range. – Moscow, IZMIRAN, 1974. - P.49-52.
11. Колесник А. Г., Колесник С. А., Нагорский П. М. //Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии ЭМС и ЭМЭ - 95. - С.- Петербург, 1995. - С. 43-44.
12. Бочкарев Г. С., Ким В. Ю., Лобачевский Л. А. и др. Взаимодействие декаметровых радиоволн на частотах, близких к МПЧ F2, при наклонном рас-

- пространении //Геомagnetизм и астрономия. – 1979. - Т. 19, № 5. - С. 831-833.
13. Бочкарев Г. С., Егоров И. Б., Еременко В. А. и др. Моделирование воздействия мощной волны на ионосферу при ее наклонном падении //Геомagnetизм и астрономия. – 1980. - Т. 20, № 6. - С. 848-853.
14. Fialer P. A. Field-aligned scattering from a heated region of the ionosphere. - Observations at HF and VHF //Radio Sci. - 1974. - V. 9, No.11. - P. 923.
15. Насыров А. М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. – Изд-во КГУ, 1991. – 149 с.
16. Rufenach C. L. Radio scintillation observations during artificial ionospheric modifications //J. Geophys. Res. – 1973. - V. 78. - P. 5611-5621.
17. Бочкарев Г. С., Булатова Н. Н., Жильцов А. У. и др. К вопросу о нелинейных свойствах ионосферы в практике коротковолнового вещания //Всесоюзный семинар “Распространение радиоволн в ионосфере”. - М.: Радио и связь. 1989. - Тезисы докладов. - С. 49.
18. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. – М.: Наука, 1977. - 342 с.





200

Отпечатано на ризографе.  
Бумага офсет. Заказ ФФ 3/05.  
Тираж 100 экз. ООП ТРО ВОИ т.: 31-55-02